

Επίδραση των επιφανειακών εδαφικών στρώσεων στη διάδοση ρηγμάτων και στην κινηματική καταπόνηση αγωγών

Ν. Μακράκης¹, Π. Ν. Ψαρρόπουλος², Α. Σέξτος³, Γ. Τσομπανάκης⁴

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι χερσαίοι και υποθαλάσσιοι αγωγοί φυσικού αερίου υψηλής πίεσης συχνά υπόκεινται σε Μόνιμες Εδαφικές Μετακινήσεις (Permanent Ground Displacements-PGDs) λόγω της σεισμικής διάρρηξης ρήγματος. Το φαινόμενο της διάδοσης ρήγματος δια μέσου εδαφικών στρώσεων, οι οποίες συνήθως καλύπτουν το βραγώδες υπόβαθρο, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η διασταύρωση ρήγματος – αγωγού είναι αρκετές φορές αναπόφευκτη, αναδεικνύει την αναγκαιότητα διερεύνησης του εν λόγω σύνθετου φαινομένου και την ποσοτικοποίηση της επίδρασής του στην απόκριση του αγωγού. Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η συσχέτιση του σεισμικού μεγέθους: (α) με την κλίση της αναδυόμενης επιφάνειας του εδάφους, σε όρους PGDs, η οποία σχηματίζεται λόγω της διάδοσης και της εμφάνισης της διάρρηξης, και (β) με την κινηματική καταπόνηση του αγωγού, σε όρους παραμόρφωσης. Σημειώνεται ότι ο αγωγός θεωρείται ότι, είτε βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους (υποθαλάσσιος), είτε είναι υπόγειος (χερσαίος). Διενεργήθηκε εκτενής παραμετρική διερεύνηση με κατάλληλα αριθμητικά προσομοιώματα για διάφορες τιμές μετακίνησης στο υπόβαθρο (συναρτήσει του σεισμικού μεγέθους), διαφορετικούς τύπους ρήγματος, γωνιών διάρρηξης, καθώς και μηχανικών ιδιοτήτων του υπερκείμενου εδάφους. Τα ευρήματα της μελέτης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον προκαταρκτικό αντισεισμικό σχεδιασμό αγωγών έναντι ενεργών σεισμικών ρηγμάτων.

Λέξεις Κλειδιά: Διάδοση διάρρηξης ρηγμάτων, Μόνιμες Εδαφικές Μετακινήσεις, Διασταύρωση ρήγματος – αγωγού, Κινηματική καταπόνηση αγωγού

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάδοση της διάρρηξης ενός σεισμικού ρήγματος στην επιφάνεια του εδάφους αποτελεί ένα πολυσύνθετο φαινόμενο, το οποίο έχει διερευνηθεί μέσω μελέτης καταγεγραμμένων περιστατικών [1], καθώς και αριθμητικών [2] και πειραματικών προσεγγίσεων [3]. Ωστόσο, η κλίση της επιφάνειας του εδάφους, η οποία σχηματίζεται λόγω της ανάδυσης της διάρρηξης, αποτελεί ζήτημα το οποίο δεν έχει διερευνηθεί συστηματικά. Επιπλέον, ελάχιστες δημοσιεύσεις συσχετίζουν το μέγεθος του σεισμού με τεκτονικά χαρακτηριστικά της διάρρηξης όπως ο τύπος του ρήγματος, το μέγεθος της μετατόπισης στο βραχώδες υπόβαθρο, το μήκος της επιφάνειας διάρρηξης, κ.α.), λαμβάνοντας [4], ή αγνοώντας [5] κατά περίπτωση, την επικάλυψη του γεωλογικού υποβάθρου από εδαφικές στρώσεις.

 $^{^1}$ Υποψήφιος Διδάκτορας, Πολυτεχνείο Κρήτης, nmakrakis@ise.tuc.gr

 $^{^2}$ Ε.ΔΙ.Π., Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, prod@central.ntua.gr

³ Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Μπρίστολ, asextos@gmail.com

⁴ Καθηγητής, Πολυτεχνείο Κρήτης, jt@science.tuc.gr



Οι αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου εκτείνονται σε μεγάλα μήκη και συχνά διασχίζουν σεισμογενείς περιοχές, με αρκετά περιστατικά αστοχίας να έχουν καταγραφεί παγκοσμίως [6]. Ωστόσο, το γεγονός ότι η πλήρης αποφυγή των σεισμογενών περιοχών είναι ενίοτε τεχνοοικονομικά ασύμφορη, αναδεικνύει τη σπουδαιότητα διερεύνησης του προβλήματος της διασταύρωσης ρήγματος – αγωγού. Υπό αυτό το πρίσμα, έχουν πραγματοποιηθεί αναλυτικές [7], πειραματικές [8] και αριθμητικές [9] διερευνήσεις, ενώ έχουν αναπτυχθεί και διεθνείς κανονισμοί (π.χ., ALA [10] και ΕC8 [11]). Ωστόσο, συνήθως ο αγωγός θεωρείται ότι είναι τοποθετημένος απευθείας στον βράχο, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση του υπερκείμενου εδάφους.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η συσχέτιση: (α) της κλίσης της επιφάνειας του εδάφους λόγω διάδοσης ενεργών διαρρήξεων, σε όρους PGDs, και (β) της δομικής απόκρισης του αγωγού, σε όρους παραμόρφωσης, με το σεισμικό μέγεθος. Στη μελέτη έχει χρησιμοποιηθεί μία αποσυζευγμένη μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ), κατά την οποία η απόκριση του εδάφους και του αγωγού προσομοιώνονται ξεχωριστά. Η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους προσομοιώνεται με ελαστο-πλαστικό τρόπο και ισοτροπική χαλάρωση, ενώ η εγκυρότητα των προτεινόμενων προσομοιωμάτων έχει επαληθευτεί με συναφή πειραματικά αποτελέσματα. Πραγματοποιείται εκτενής παραμετρική διερεύνηση, εξετάζοντας κανονικά και ανάστροφα ρήγματα, διάφορες γωνίες διάρρηξης και μεγέθη σεισμού (συναρτήσει της μετατόπισης του βραχώδους υποβάθρου). Επιπλέον, το γεωλογικό υπόβαθρο θεωρείται ότι καλύπτεται από αμμώδες εδαφικό στρώμα, ποικίλου πάχους και μηχανικών ιδιοτήτων.

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η διάρρηξη ενός σεισμικού ρήγματος οδηγεί στην απότομη μετατόπιση των πετρωμάτων του φλοιού της γης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απευθείας καταπόνηση των αγωγών που βρίσκονται στο βραχώδες ανάγλυφο (Σχ. 1α). Συνήθως όμως η διάρρηξη διαδίδεται από το βραχώδες υπόβαθρο προς την επιφάνεια δια μέσου εδαφικών στρώσεων, με πάχος που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως χιλιάδες μέτρα, ανάλογα με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες, δημιουργώντας μία κεκλιμένη επιφανειακή ζώνη παραμόρφωσης, επηρεάζοντας επιφανειακούς ή υπόγειους αγωγούς με έναν πιο σύνθετο τρόπο (Σχ. 1β).

Στην παρούσα εργασία, η συσχέτιση της μέσης μετατόπισης (στο βραχώδες υπόβαθρο / ανάγλυφο), AD, με το μέγεθος της σεισμική ροπής, M, βασίζεται στην εμπειρική σχέση των Wells και Coppersmith [5] για κανονικά και ανάστροφα ρήγματα:

$$\log(AD) = \alpha + b \cdot M \tag{1}$$

όπου, α και b είναι συντελεστές παλινδρόμησης, ίσοι με -4.80 και 0.69, με τυπική απόκλιση 0.36, και τυπικά σφάλματα 0.57 και 0.08, αντίστοιχα. Επίσης, το μέγεθος, Μ, κυμαίνεται από 5.6 έως 8.1, ενώ η μετατόπιση, AD, από 0.05 m έως 8.0 m.



Σχήμα 1: Διασταύρωση ρήγματος – αγωγού: α) χωρίς και β) με την παρουσία υπερκείμενου εδάφους.

3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος πραγματοποιείται στο λογισμικό ABAQUS [12]. Προσομοιώνεται η διατομή μιας ομοιόμορφης στρώσης εδάφους, η οποία καλύπτει το βραχώδες υπόβαθρο και έχει πάχος, Η, και πλάτος, Β, όπου $B = 4 \cdot H - \kappa \alpha \tau'$ ελάχιστον- έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των πλευρικών κατακόρυφων συνόρων [13]. Στην παρούσα διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο πλάτος ($B = 8 \cdot H$) για κανονικά ρήγματα που καλύπτονται από εδαφικές στρώσεις πάχους άνω των 50 m, καθώς και για ανάστροφα ρήγματα, ανεξαρτήτως πάχους εδαφικής στρώσης. Η προσομοίωση έγινε με τετρακομβικά ΠΣ οριζόντιας παραμόρφωσης (CPE4), με αραιό κάναβο στα άκρα και πυκνό στην περιοχή του ρήγματος [14] (Σχ. 2). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια: αρχικά εφαρμόζονται οι γεωστατικές τάσεις και στη συνέχεια εφαρμόζεται η μετατόπιση του ρήγματος, όπου στους κόμβους της κατακόρυφης επιφάνειας και στους κόμβους βάσης του υπερκείμενου τεμάχους επιβάλλεται διαφορική μετατόπιση σε προκαθορισμένη γωνία, α. Οι βαθμοί ελευθερίας στους κόμβους της βάσης του υποκείμενου τεμάχους είναι παγιωμένοι, ενώ στους κόμβους της κατακόρυφης επιφάνειας εφαρμόζονται συνθήκες κύλισης (Σχ. 2).

Η μη-γραμμικότητα του εδάφους προσομοιώνεται με το ελαστοπλαστικό καταστατικό προσομοίωμα τύπου Mohr-Coulomb με ισοτροπική χαλάρωση των Anastasopoulos et al. [18], όπου η συμπεριφορά του εδάφους πριν από την αστοχία του θεωρείται ελαστική, με μέτρο διάτμησης, G, ενώ μετά την αστοχία καθορίζεται με βάση το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και ισοτροπική χαλάρωση. Σύμφωνα με την ισοτροπική χαλάρωση, η γωνία εσωτερικής τριβής, φ, και η γωνία διασταλτικότητας, ψ, μειώνονται γραμμικά καθώς αυξάνεται η οκταεδρική πλαστική διατμητική παραμόρφωση, γ^poct, ως εξής:

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_p - \frac{\varphi_p - \varphi_{res}}{\gamma_f^p} \gamma_{oct}^p & \\ \varphi_{res} & , \end{cases} \psi = \begin{cases} \psi_p \left(1 - \frac{\gamma_{oct}^p}{\gamma_f^p} \right) & \gamma \iota \alpha & 0 \le \gamma_{oct}^p < \gamma_f^p \\ \psi_{res} & \gamma \iota \alpha & \gamma_{oct}^p \ge \gamma_f^p \end{cases}$$
(2)



όπου, φ_p και φ_{res} είναι η μέγιστη και η υπολειπόμενη γωνία εσωτερικής τριβής, αντίστοιχα, ενώ ψ_p και ψ_{res} συμβολίζουν τις αντίστοιχες γωνίες διασταλτικότητας. Επιπλέον, το γ^pf εκφράζει την οκταεδρική πλαστική διατμητική παραμόρφωση αστοχίας στο τέλος της χαλάρωσης του εδάφους. Σημειώνεται ότι το εν λόγω καταστατικό προσομοίωμα έχει εφαρμοστεί στο λογισμικό ABAQUS μέσω υπορουτίνας, η οποία έχει αναπτυχθεί από τους Chatzidakis et al. [15].

3.1 Σύγκριση με Πειραματικά Αποτελέσματα

Η αξιοπιστία του αριθμητικού προσομοιώματος έχει επαληθευτεί μέσω της σύγκρισης με ένα πείραμα φυγοκεντρικής επιτάχυνσης 100g [18]. Στο εν λόγω πείραμα, εδαφική στρώση πάχους, H = 25 m, και άμμου σχετικής πυκνότητας, $D_r = 80 \%$, υποβλήθηκε σε διάφορες τιμές μετατόπισης υποβάθρου, D = 0.25, 0.5, 0.85 και 1.08 m και D = 0.18, 0.49, 0.7 και 1.13 m για κανονικό και ανάστροφο ρήγμα με γωνία διάρρηξης 60°. Τα αριθμητικά αποτελέσματα βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά, όσον αφορά τις κατακόρυφες εδαφικές μετατοπίσεις, dz, ανεξάρτητα από τον τύπο του ρήγματος, ειδικά για χαμηλά επίπεδα μετατόπισης στον βράχο. Ωστόσο, παρατηρούνται μικρές διαφορές για μεγάλες μετατοπίσεις βράχου. Αναλυτική παρουσίαση της σύγκρισης δίδεται από τους Chatzidakis et al. [16].



Σχήμα 2: Αριθμητικό προσομοίωμα εδαφικής στρώσης πάχους 50 m για α) κανονικό β) ανάστροφο ρήγμα.

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΑΓΩΓΟΥ

Το λογισμικό ABAQUS έχει χρησιμοποιηθεί και για την προσομοίωση της απόκρισης του αγωγού. Ο αγωγός προσομοιώνεται με ειδικά διδιάστατα γραμμικά στοιχεία τύπου PIPE21. Η αλληλεπίδραση αγωγού - εδάφους πραγματοποιείται σε δύο διαστάσεις (αξονική και κατακόρυφη) μεσω διδιάστατων συνοριακών στοιχείων τύπου PSI24, τα οποία αποτελούνται από τέσσερις κόμβους με το ένα ζεύγος κόμβων να βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους και το άλλο να είναι προσαρτημένο στον αγωγό. Η απόσταση μεταξύ των παραπάνω ζευγών κόμβων αντιστοιχεί στο βάθος επίχωσης του αγωγού, Η_b, ενώ οι εδαφικές μετακινήσεις που έχουν υπολογιστεί επιβάλλονται στον αγωγό μέσω των στοιχείων PSI. Στη διερεύνηση έχει χρησιμοποιηθεί ένας αγωγός πολύ μεγάλου μήκους για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των συνοριακών συνθηκών, όπου τα άκρα του και οι επιφανειακοί κόμβοι των στοιχείων PSI προς



το υποκείμενο τέμαχος είναι παγιωμένοι, ενώ προς το υπερκείμενο μετακινούνται σύμφωνα με τη μετατόπιση του ρήγματος (Σχ. 3).

4.1 Σύγκριση με Πειραματικά Αποτελέσματα

Το αριθμητικό προσομοίωμα έχει συγκριθεί με τα πειραματικά αποτελέσματα των Tsatsis et al. [8] για κανονικό και ανάστροφο ρήγμα. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ξηρή άμμος με $D_r = 90\%$. Ο αγωγός (υπό κλίμακα) είχε διάμετρο D = 35 mm, πάχος τοιχώματος, t = 0.5 mm και αποτελούνταν από χάλυβα ποιότητας AISI Type 444. Το βάθος επίχωσης του αγωγού ήταν, $H_b = 0.55$ m. Μελετήθηκαν τέσσερις (κανονικοποιημένες) κατακόρυφες μετατοπίσεις, D / H = 0.5, 1, 1.5 και 2 m. Ως μέτρο σύγκρισης χρησιμοποιήθηκε η αξονική παραμόρφωση στην κάτω παρειά του αγωγού, ε_{11,invert}. Για κανονικά ρήγματα, το προτεινόμενο αριθμητικό προσομοίωμα υπερεκτιμά ελαφρώς την εφελκυστική παραμόρφωση, παρουσιάζοντας καλύτερη ταύτιση στις θλιπτικές παραμορφώσεις. Αντιθέτως, για ανάστροφα ρήγματα, οι αξονικές παραμορφώσεις υπερεκτιμώνται για μικρές μετατοπίσεις ρήγματος. Αναλυτική παρουσίαση της σύγκρισης γίνεται από τους Chatzidakis et al. [16].



Σχήμα 3: Αριθμητικό προσομοίωμα αγωγού.

5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Πραγματοποιείται παραμετρική διερεύνηση λαμβάνοντας υπόψιν κανονικά και ανάστροφα ρήγματα, με γωνίες διάρρηξης, α = 30° και 60° και τρεις τιμές μετακίνησης υποβάθρου: D = 0.48 1.07 m και 2.37 m, που αντιστοιχούν σε M = 6.5, 7.0 και 7.5. Προσομοιώνεται μία ομοιόμορφη στρώση εδάφους, χαλαρής (Loose Sand - LS), μέτριας (Medium Sand – MS) και πυκνής (Dense Sand – DS) άμμου, έχοντας πάχος H, από 5 έως 100 m. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τις μηχανικές ιδιότητες των τριών εδαφικών υλικών, όπου το μέτρο ελαστικότητας, E, μεταβάλλεται συναρτήσει του βάθους της εδαφικής στρώσης, z.

Επίσης, προσομοιώνεται ένας τυπικός αγωγός διαμέτρου, $D = 2 \cdot R = 0.914$ m (36 in), πάχους τοιχώματος, t = 19.05 mm (0.75 in), (R / t = 24) και συνολικού μήκους μερικών χιλιομέτρων. Επιλέχθηκε ποιότητα χάλυβα API 5L X65 (E = 210 GPa, v = 0.3, με τάσεις διαρροής και θραύσης $\sigma_1 = 450$ MPa και $\sigma_2 = 530$ MPa, αντίστοιχα). Η αλληλεπίδραση αγωγού - εδάφους υπολογίζεται σύμφωνα με τον κανονισμό ALA, με βάση την πυκνότητα της άμμου, τη γωνία, ϕ_p , τον συντελεστή πλευρικής ώθησης σε ηρεμία, $K_o = 0.5$, και τον συντελεστή τριβής για αγωγό από λείο χάλυβα, f = 0.7. Το βάθος επίχωσης, H_b, είναι ίσο με 2 m, από το μέσον του αγωγού.

Η διάδοση της διάρρηξης ρήγματος διερευνάται: (α) σε όρους PGDs, συναρτήσει του λόγου x / Η, όπου x είναι η θέση κατά μήκος της διατομής του εδάφους, και (β) σε όρους πλαστικής παραμόρφωσης. Η καταπόνηση του αγωγού εξετάζεται σε όρους εφελκυστικών και θλιπτικών



παραμορφώσεων, ενώ πραγματοποιείται σύγκριση με τα όρια των διεθνών κανονισμών (EC8 και ALA). Στη συνέχεια λόγω περιορισμένου χώρου παρουσιάζονται μόνο οι θλιπτικές παραμορφώσεις, για κανονικό και ανάστροφο ρήγμα με α = 30°, M = 7.0 και H = 20 m.

Τύπος Άμμου	Πυκνό τητα (t/m ³)	Μέτρο Ελαστικότητας Ε(z) (MPa)	Λόγος Poisson v (-)	Γωνία Εσωτ. Τριβής φ _P – φres (°)	Γωνία Διασταλτικότητας Ψpl - Ψres (°)
Χαλαρή (Loose - LS)	1.6	5 + 0.75 z	0.33	30	0
Μέτρια (Medium - MS)	1.8	10 + 1.5 z	0.33	34 - 30	6 - 0
Πυκνή (Dense - DS)	2.0	20 + 3 z	0.33	39 - 30	11 - 0

Πίνακας	1:	Μηγανικές	Ιδιότητες τ	του Εδάφους.
i i concorg	· ·	1111 A THOSE	101011105	iee Beageogi

5.1 Επιρροή των Εδαφικών Ιδιοτήτων

Για την περίπτωση κανονικού ρήγματος εμφανίζονται στην επιφάνεια του εδάφους δύο ζώνες διάρρηξης αντίθετης κλίσης, ανεξαρτήτως τύπου άμμου, σχηματίζοντας μία τεκτονική τάφρο (Σχ. 4). Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν ισχύει για την περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος (Σχ. 5). Επιπρόσθετα, παρατηρούνται πιο απότομες μετατοπίσεις και μεγαλύτερες τιμές πλαστικής παραμόρφωσης για πυκνή άμμο (DS), ανεξαρτήτως τύπου ρήγματος. Αυτό οφείλεται στα χαμηλότερα επίπεδα ελαστικής παραμόρφωσης της DS. Επίσης, αναπτύσσονται ζώνες παραμόρφωσης μεγαλύτερου πλάτους για κανονικό ρήγμα και χαλαρή άμμο (LS). Από την άλλη, ο αγωγός που είναι θαμμένος σε χαλαρή εδαφική στρώση, LS, παρουσιάζει χαμηλότερη θλιπτική παραμόρφωση, για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια (Σχ. 6). Επιπλέον, η ύπαρξη του εδάφους οδηγεί σε σημαντική μείωση των παραμορφώσεων, σε σύγκριση με την περίπτωση που ο αγωγός τοποθετείται απευθείας στον βράχο, ειδικά για ανάστροφο ρήγμα.



Σχήμα 4: Διάδοση της διάρρηξης κανονικού ρήγματος: α) PGDs, και β) πλαστικές παραμορφώσεις.



5.2 Κλίση Επιφάνειας Εδάφους και Εμπειρικές Συσχετίσεις

Ο υπολογισμός της κλίσης της επιφάνειας του εδάφους πραγματοποιείται στα παραμορφωμένα προσομοιώματα του εδάφους, εντός του γραφικού περιβάλλοντος του ABAQUS. Ύστερα από τη γραφική απόδοση των τιμών κλίσης του εδάφους για κάθε ένα από τα σενάρια που έχουν εξεταστεί, επιλέγεται η κατάλληλη συνάρτηση:

$$f(x) = a \cdot e^{bx} \tag{4}$$

όπου f(x) είναι ο λόγος D / H, α και b συντελεστές με όρια εμπιστοσύνης 95% και x η κλίση της επιφάνειας του εδάφους.

Η χαλαρή εδαφική στρώση (LS) παρουσιάζει χαμηλότερη κλίση σε σύγκριση με τις MS και DS, ανεξάρτητα από το μέγεθος του σεισμού, τη γωνία διάρρηξης και τον τύπο ρήγματος (Σχ. 7). Η διάδοση της διάρρηξης κανονικού ρήγματος υπό γωνία $a = 30^{\circ}$ έχει ως αποτέλεσμα να σχηματίσει μεγαλύτερη κλίση στην επιφάνεια του εδάφους σε σύγκριση με τη γωνία $a = 60^{\circ}$. Ωστόσο, αυτό δεν παρατηρείται στα ανάστροφα ρήγματα, όπου η διάδοση της αστοχίας δια μέσω εδαφικών αποθέσεων πάχους $H \ge 20$ m οδηγεί σε σημαντικά μικρότερη κλίση της επιφάνειας του εδάφους για όλες τις εξεταζόμενες γωνίες διάρρηξης και μεγέθη σεισμού (Σχ. 8). Αντιθέτως, μεγαλύτερη κλίση της επιφάνειας του εδάφους προκύπτει κατά τη διάδοση της διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος για μικρό πάχος εδαφικής στρώσης H < 20 m και μεγάλα μεγέθη σεισμού.



Σχήμα 5: Διάδοση της διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος: α) PGDs και β) πλαστικές παραμορφώσεις.

Όσον αφορά τη συσχέτιση των μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων με το σεισμικό μέγεθος, υψηλότερα επίπεδα παραμόρφωσης παρατηρούνται για πυκνή εδαφική στρώση (DS), ανεξαρτήτως τύπου ρήγματος και γωνίας διάρρηξης. Επίσης, για εδαφική στρώση LS και MS και κανονικό ρήγμα με α = 60°, ο αγωγός εμφανίζει θλιπτικές παραμορφώσεις μικρότερες από τα κανονιστικά όρια, ανεξάρτητα από το σεισμικό μέγεθος (Σχ. 9). Αντίθετα, μεγαλύτερες από τις επιτρεπόμενες θλιπτικές παραμορφώσεις παρατηρούνται όταν ο αγωγός τοποθετείται



απευθείας στον βράχο ή είναι θαμμένος σε μία εδαφική στρώση πολύ μικρού πάχους H = 5 m, για M = 7.0 ανεξαρτήτως τύπου άμμου και γωνίας διάρρηξης. Τέλος, για M = 7.5, παρατηρείται υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής του συγκεκριμένου χάλυβα.





Σχήμα 7: Κλίση επιφάνειας εδάφους για κανονικό ρήγμα και έδαφος: α) LS, β) MS και c) DS.





Σχήμα 8: Κλίση επιφάνειας εδάφους για ανάστροφο ρήγμα και έδαφος: α) LS, β) MS και γ) DS.



Σχήμα 10: Θλιπτικές παραμορφώσεις αγωγού για ανάστροφο ρήγμα και έδαφος: α) LS, β) MS και γ) DS.

Σημειώνεται ότι στα παραπάνω αποτελέσματα δεν έχουν ληφθεί υπόψιν τα φορτία λειτουργίας του αγωγού. Στο Σχ. 11α παρατηρείται ότι για εσωτερική πίεση αγωγού, pint = 14 MPa, αποτρέπεται η αστοχία έναντι φαινομένων τοπικού λυγισμού. Επιπρόσθετα, έχει διερευνηθεί η παρουσία τόσο εσωτερικής όσο και εξωτερικής πίεσης, όπου λαμβάνοντας υπόψιν τρεις διαφορετικές εξωτερικές πιέσεις (7, 14, 21 MPa) προκύπτει ότι ο αγωγός εμφανίζει σημαντικές θλιπτικές παραμορφώσεις για pext = 21 MPa. Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί σε υποθαλάσσιο αγωγό ο οποίος τοποθετείται σε βάθος 2100 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (Σχ. 11β).





Σχήμα 11: Θλιπτικές παραμορφώσεις αγωγού για διάφορες τιμές πίεσης.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία διερευνά το φαινόμενο της διάδοσης ενεργών διαρρήξεων στην επιφάνεια του εδάφους και το πρόβλημα της διασταύρωσης ρήγματος – αγωγού. Ο κύριος στόχος της είναι η συσχέτιση του σεισμικού μεγέθους: α) με την κλίση της επιφάνειας του εδάφους που δημιουργείται ύστερα από τη διάδοση της αστοχίας, σε όρους PGDs, και β) με την κινηματική καταπόνηση ενός αγωγού φυσικού αερίου, σε όρους παραμόρφωσης. Πραγματοποιείται παραμετρική διερεύνηση για διάφορους τύπους ρήγματος, γωνιών διάρρηξης, τιμών μετακίνησης υποβάθρου, καθώς και μηχανικών ιδιοτήτων της αμμώδους εδαφικής στρώσης. Τα κύρια συμπεράσματα συνοψίζονται ως εξής:

- Η διάδοση της διάρρηξης δια μέσου αποθέσεων χαλαρής άμμου οδηγεί σε αισθητά χαμηλότερη κλίση της επιφάνειας του μετατοπιζόμενου εδάφους, αλλά και σε χαμηλότερα επίπεδα παραμόρφωσης των υπόγειων αγωγών, ανεξάρτητα από το μέγεθος του σεισμού (μείωση της μέγιστης απόλυτης τιμής των θλιπτικών παραμορφώσεων κατά 60% και 80% για κανονικό και ανάστροφο ρήγμα, αντίστοιχα).
- Για ανάστροφο ρήγμα, η διάδοση αστοχίας δια μέσου εδαφικής στρώσης μεγαλύτερου πάχους, Η ≥ 20 m, οδηγεί σε σημαντικά μειωμένη κλίση της επιφάνειας του εδάφους και των παραμορφώσεων του αγωγού, ανεξάρτητα από τη γωνία διάρρηξης, τον τύπο της άμμου και το μέγεθος του σεισμού. Επομένως, η διασταύρωση ανάστροφου ρήγματος αγωγού θα μπορούσε να είναι ασφαλής υπό την προϋπόθεση ότι ο αγωγός είναι θαμμένος σε εδαφική στρώση πάχους τουλάχιστον 20 m.
- Η διάδοση κανονικού ρήγματος, υπό γωνία 30° έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη κλίση της επιφάνειας του εδάφους (σε σύγκριση με α = 60°), ανεξάρτητα από τον τύπο της άμμου, το πάχος της εδαφικής στρώσης και του μεγέθους του σεισμού. Αντίθετα, για κανονικό ρήγμα γωνίας 60°, εμποδίζεται η ανάπτυξη παραμορφώσεων αγωγού μεγαλύτερων από τα κανονιστικά όρια, ανεξαρτήτως μεγέθους σεισμού και ιδιοτήτων του εδαφικού υλικού.

Τα ευρήματα της μελέτης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον προκαταρκτικό αντισεισμικό σχεδιασμό αγωγών φυσικού αερίου. Γενικά, η παρουσία εδαφικών αποθέσεων συνήθως μειώνει τις παραμορφώσεις του αγωγού, ενώ η παρουσία λεπτών εδαφικών στρώσεων αυξάνει την



πολυπλοκότητα της διάδοσης της διάρρηξης και θα πρέπει να εξετάζεται ανά περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις κρίσιμες παραμέτρους.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Bray JD, Seed RB, Seed HB. Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil. *Journal* of Geotechnical Engineering 1994; **120**(3): 543–561.
- 2. Loukidis D, Bouckovalas GD, Papadimitriou AG. Analysis of fault rupture propagation through uniform soil cover. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2009; **29**(11–12): 1389–1404.
- 3. Chang YY, Lee CJ, Huang WC, Hung WY, Huang WJ, Lin ML, *et al.* Evolution of the surface deformation profile and subsurface distortion zone during reverse faulting through overburden sand. *Engineering Geology* 2015; **184**: 52–70.
- 4. Turgut A, Isik NS, Kasapoglu KE. A new empirical equation proposed for the relationship between surface rupture length and the earthquake source parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 2017; **76**(1): 383–392.
- 5. Wells DL, Coppersmith KJ. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin Seismological Society of America* 1994; **84**(4): 974–1002.
- 6. Nair GS, Dash SR, Mondal G. Review of pipeline performance during earthquakes since 1906. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 2018; **32**(6): 04018083.
- 7. Karamitros DK, Bouckovalas GD, Kouretzis GP. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2007; **27**(3): 200–211.
- 8. Tsatsis A, Loli M, Gazetas G. Pipeline in dense sand subjected to tectonic deformation from normal or reverse faulting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2019; **127**: 105780.
- 9. Fadaee M, Farzaneganpour F, Anastasopoulos I. Response of buried pipeline subjected to reverse faulting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2020; **132**: 106090.
- 10. American Lifelines Alliance. Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe. Reston, VA: ASCE; 2001.
- 11. European Commitee for Standardization (CEN). EN 1998-4:2006 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 4: Silos, tanks and pipelines. 2006.
- 12. Simulia. ABAQUS 6.14 Analysis user's manual. Dassault Systèmes Simulia Corp., RI, USA. 2014.
- 13. Bray JD. The effects of tectonic movements on stresses and deformations in earth embankments. Tech. Rep. University of California, Berkley, CA, USA, 1990.
- 14. Anastasopoulos I, Gazetas G, Bransby MF, Davies MCR, El Nahas A. Fault rupture propagation through sand: finite-element analysis and validation through centrifuge experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2007; **133**(8): 943–958.
- 15. Chatzidakis D, Tsompanakis Y, Psarropoulos PN. Numerical investigation of secondary-fault rupture propagation through sandy deposits. *Engineering Geology* 2021; **292**: 106258.
- 16. Chatzidakis D, Tsompanakis Y, Psarropoulos PN. Kinematic distress of pipelines subjected to secondary seismic fault rupture. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2022; **152**: 107065.